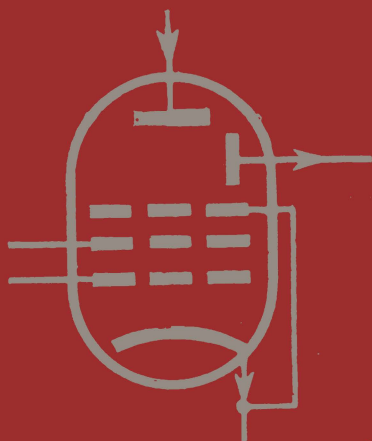


В. Г. МЕЛЬЦЕР



ЛАМПЫ

С ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИЕЙ

И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



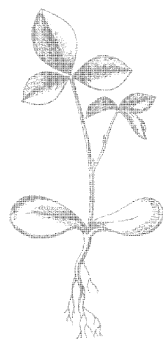
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 514

В. Г. МЕЛЬЦЕР

ЛАМПЫ
С ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИЕЙ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ



Scan AAW

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА

1964

ЛЕНИНГРАД

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А., Ванеев В. И.,
Геништа Е. Н., Джигит И. С., Жеребцов И. П.,
Канаева А. М., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А.,
Смирнов А. Д., Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

УДК 621 385 15

М 48

Рассматриваются принцип действия и особенности ламп с вторичной электронной эмиссией, поясняются их характеристики и параметры и приводятся примеры практического использования этих ламп.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей.

Мельцер Владимир Гильевич

Лампы с вторичной эмиссией и их применение.
М.—Л., Издательство «Энергия», 1964. 24 стр. с илл.
(Массовая радиобиблиотека. Вып. 514).
Темплан 1964. № 344

Редактор **Р. Е. Елисеев**

Техн. редактор **В. И. Сологубов**

Обложка художника **А. М. Кувшинникова**

Сдано в пр-во 8/І-1964 г.

Подписано к печати 6/ІІІ-1964 г.

Формат бумаги 84×108¹/₃₂

1,23 п. л.

Уч.-изд. л. 1,6

Т-04205

Тираж 36 000 экз.

Цена 06 коп.

Зак. 1012

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,
Шлюзовая наб., 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
<i>Глава первая. Лампы с вторичной эмиссией</i>	<i>5</i>
Конструкция и принцип действия	5
Характеристики и параметры	8
Особенности питания диодной цепи	12
<i>Глава вторая. Применение ламп с вторичной эмиссией</i>	<i>14</i>
Усилители	14
Генераторы	18
Высокоскоростные электронные ключи	22
Пересчетные схемы	24

ПРЕДИСЛОВИЕ

Использование явления вторичной электронной эмиссии в электровакуумных приборах позволило создать новую электронную лампу, имеющую ряд интересных особенностей и преимуществ по сравнению с обычными радиолампами.

В Советском Союзе лампы с вторичной эмиссией к настоящему времени успели найти самое разнообразное применение. Достаточно сказать, что современные схемы формирования импульсов наносекундной длительности строятся в основном на лампах с вторичной эмиссией. Не менее важное значение имеют эти лампы при создании широкополосных усилителей, фазоинверторов, высокоомных входных и буферных каскадов и пр. Весьма оригинально использование лампы с вторичной эмиссией в качестве электронного ключа в высокоскоростных переключающих схемах, применяемых в различных системах дискретного действия.

Однако отсутствие популярной радиотехнической литературы, знакомящей широкие круги радиотехников с принципом работы, особенностями и возможностями ламп с вторичной эмиссией, в известной степени ограничивает их применение. Настоящая брошюра предназначена хоть в какой-то мере восполнить этот пробел.

Автор будет признателен всем, кто пришлет свои замечания по содержанию брошюры.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЛАМПЫ С ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИЕЙ

Вторичная электронная эмиссия из металлов была впервые открыта в начале XX столетия. Вторичной электронной эмиссией называется явление, при котором поверхность твердого тела, находящегося в вакууме и подвергающегося бомбардировке первичными электронами, сама начинает испускать электроны. Эти электроны называются *вторичными*.

Количественной мерой, характеризующей вторичную эмиссию из различных материалов, служит *коэффициент вторичной эмиссии*. Под коэффициентом вторичной эмиссии понимают отношение тока вторичных электронов к току первичных, или, другими словами, среднее число вторичных электронов, выбиваемых одним первичным.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Устройство лампы с вторичной эмиссией показано на рис. 1, а ее условное обозначение — на рис. 2.

Первичный электронный поток, вылетающий с катода 1 и ускоряемый полями управляющей сетки 2 (если она положительна) и

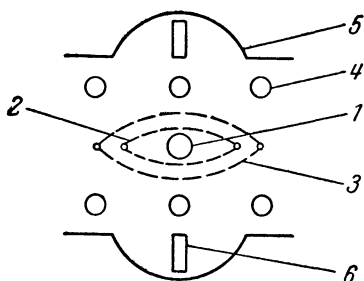


Рис. 1. Устройство лампы с вторичной эмиссией (поперечный разрез).

1 — катод; 2 — управляющая сетка; 3 — экранирующая сетка; 4 — направляющие траверсы; 5 — динод; 6 — анод.

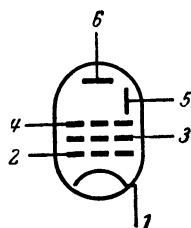


Рис. 2. Условное обозначение лампы с вторичной эмиссией.

1 — катод; 2 — управляющая сетка; 3 — экранирующая сетка; 4 — направляющие траверсы; 5 — динод; 6 — анод.

экранирующей сетки 3, попадает на динод 5. Динодом называется электрод, поверхность которого покрыта веществом с коэффициентом вторичной эмиссии $\sigma > 1$ (у современных ламп с вторичной эмиссией $\sigma = 2 \div 3$). При бомбардировке первичными электронами

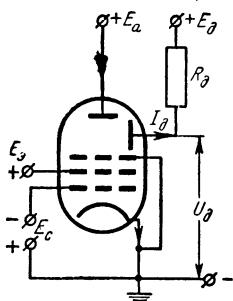


Рис. 3 Схема с нагрузкой в динодной цепи.

динода из него выбиваются вторичные электроны. Режим работы лампы выбирается таким, чтобы потенциал динода был на несколько десятков вольт ниже потенциала анода 6. Поэтому вторичные электроны попадают в ускоряющее поле анода и движутся к нему. Для предотвращения попадания первичных электронов на анод перед ним поставлены специальные траверсы 4, соединенные с катодом и направляющие первичный электронный поток непосредственно на динод.

Условно можно считать, что лампа с вторичной эмиссией состоит из двух частей: пентодной, в которой динод выполняет функцию анода и диодной, образованной анодом и динодом, выполняющим в ней функцию вторичного катода. В пентодной части протекает первичный катодный ток I_k , в диодной — ток вторичных электронов I_a . При правильном выборе режима работы лампы все вторичные электроны, выбитые из динода, достигают анода. Поэтому можно считать, что

$$I_a = \sigma I_k.$$

Ток динода I_d представляет собой разность катодного и анодного токов лампы:

$$I_d = I_k - I_a = (1 - \sigma) I_k. \quad (1)$$

Так как в обычном режиме работы лампы с вторичной эмиссией значение коэффициента вторичной эмиссии $\sigma > 1$, то динодный ток имеет отрицательный знак, что соответствует его направлению от динода во внешнюю цепь.

При включении в динодную цепь нагрузочного сопротивления R_d (рис. 3) потенциал динода U_d становится выше напряжения источника питания E_d на величину падения напряжения на нагрузке, т. е.

$$U_d = E_d + |I_d| R_d,$$

где $|I_d|$ — абсолютное значение динодного тока. При увеличении напряжения E_c на управляющей сетке лампы увеличивается динодный ток и потенциал динода; таким образом *напряжение, снимаемое с динодной нагрузки, находится в фазе с напряжением на управляющей сетке*. В этом заключается первая особенность ламп с вторичной эмиссией, отличающая их от обычных ламп. Эта особенность широко используется при построении схем двухтактных усилителей, фазоинверторов, а также для создания положительной обратной связи между динодом и управляющей сеткой в одноламповых генераторах.

При построении схем генераторов на лампах с вторичной эмиссией часто также используют еще одну их особенность, состоящую

в том, что анодный ток лампы в σ раз больше катодного. Это позволяет получить генерацию в одноламповой схеме путем создания положительной обратной связи между анодом и катодом (в случае обычных ламп такая возможность исключена, поскольку анодный ток в них составляет часть катодного).

Большое преимущество ламп с вторичной эмиссией перед обычными лампами заключается также в более высоком значении коэффициента широкополосности. Под коэффициентом широкополосности K электронной лампы понимают уменьшенное в 2π раз отношение анодно-сеточной крутизны S к сумме входной $C_{вх}$ и выходной $C_{вых}$ емкостей лампы:

$$K = \frac{S}{2\pi (C_{вх} + C_{вых})}.$$

Физически коэффициент широкополосности представляет собой произведение коэффициента усиления однолампового усилительного каскада с реостатной нагрузкой на средних частотах (на которых можно не учитывать междуэлектродные емкости лампы) на верхнюю граничную частоту полосы пропускания каскада (т. е. на ту частоту, на которой действие междуэлектродных емкостей приводит к снижению коэффициента усиления на 30%). Знание величины коэффициента широкополосности лампы позволяет судить о ее способности усиливать напряжения высокой частоты. Очевидно, чем большее значение имеет коэффициент широкополосности, тем выше значение верхней граничной частоты сигнала, усиливаемого лампой с заданным значением коэффициента усиления.

Умножение катодного тока в лампе с вторичной эмиссией в σ раз равносильно увеличению в это же число раз анодно-сеточной крутизны по сравнению с обычными лампами. При этом повышение анодно-сеточной крутизны в лампе с вторичной эмиссией не сопровождается увеличением междуэлектродных емкостей (так как расстояния между электродами остаются неизменными), чем и объясняется более высокое значение ее коэффициента широкополосности. В табл. 1 приведены коэффициенты широкополосности некоторых современных ламп, предназначенных для усиления напряжения высокой частоты и для сравнения лампы 6В1П с вторичной эмиссией. Из таблицы следует, что лампа 6В1П имеет коэффициент широкополосности в 1,5 раза выше, даже такой широкополосной лампы, как 6Ж9П. Это важное достоинство ламп с вторичной эмиссией в сочетании с таким их свойством, как наличие двух противофазных выходов (анодного и диодного) позволяет эффективно применять такие лампы при создании широкополосных усилительных схем.

Таблица 1

**Коэффициенты
широкополосности некоторых
электронных ламп**

Тип лампы	$C_{вх},$ пф	$C_{вых},$ пф	$S, \frac{ма}{в}$	$K,$ Мгц
6Ж1П	2,1	4,0	5,2	135
6Ж3П	7,0	8,5	5,0	51,5
6Ж5П	2,2	8,5	9,0	133
6Ж9П	3,5	8,5	17,5	232
6Э5П	3,0	16,0	30,0	250
6П15П	7,0	13,5	14,7	113
6В1П	9,0	4,6	29,0	340

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ

Так как лампа с вторичной эмиссией имеет два выходных электрода, то при рассмотрении характеристик и параметров такой лампы их удобно разбить на три группы.

К первой группе характеристик относятся зависимости анодного тока от напряжений на управляющей сетке и на аноде лампы, ко второй группе — зависимости диодного тока от напряжений на управляющей сетке и на диноде, к третьей группе — зависимости анодного тока от напряжения на диноде и диодного тока от напряжения на аноде.

На рис. 4 приведены зависимости анодного тока от напряжения на управляющей сетке при различных напряжениях на диноде. Напряжения на аноде и экранирующей сетке лампы поддерживаются постоянными.

При достаточно малом напряжении на диноде $U_{д1}$ ($U_{д1} < U_a$) весь первичный поток электронов, эмиттируемый катодом, достигает анода. Работа лампы в этом случае ничем не отличается от работы обычного пентода.

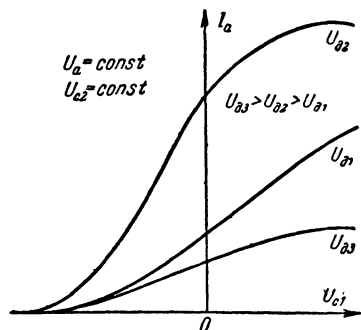


Рис. 4. Анодно-сеточные характеристики.

С увеличением напряжения на диноде все большая часть первичных электронов попадает на динод и выбивает из него вторичные электроны. Вследствие этого увеличиваются анодный ток и *крутизна по первой сетке* $S_{a.c}$. Увеличение анодного тока и крутизны $S_{a.c}$ с увеличением напряжения на диноде продолжается до тех пор, пока напряжение на диноде не достигает значения $U_{д2}$ примерно равного половине напряжения на аноде лампы.

Дальнейшее увеличение потенциала динода приводит к уменьшению анодного тока из-за возникновения около динода пространственного заряда. Это происходит потому, что при увеличении потенциала динода разность потенциалов между анодом и динодом уменьшается, т. е. ослабляется действие ускоряющего поля, заставляющего вторичные электроны двигаться к аноду. Часть электронов, не обладающая необходимой энергией, не доходит до анода и образует около динода пространственный заряд. Вновь вылетающие из динода вторичные электроны начинают теперь испытывать отталкивающее действие этого пространственного заряда. В результате анода достигают лишь те электроны, которые обладают энергией, достаточной для преодоления противодействия пространственного заряда; остальные электроны возвращаются на динод. При напряжении на диноде $U_{д3}$, близком к напряжению на аноде U_a , ток вторичных электронов почти прекращается, и анодный ток резко снижается.

Возникновение пространственного заряда снижает крутизну $S_{a.c}$. Это приводит к перегибу анодно-сеточных характеристик при положительных напряжениях на сетке. При больших напряжениях на

диноде этот перегиб наступает раньше. В лампе 6В1П, например, он начинается при напряжениях на сетке U_c , близких к 2—3 в.

На рис. 5 приведены зависимости анодного тока от анодного напряжения при постоянных напряжениях на диноде и экранирующей сетке. При анодных напряжениях, значительно меньших динодного U_d , анодный ток практически отсутствует, так как на вторичные электроны, выбиваемые с динода, ускоряющее поле анода не действует, и они возвращаются на динод. Небольшой анодный ток появляется при напряжении анода U_{a1} , немного меньшим напря-

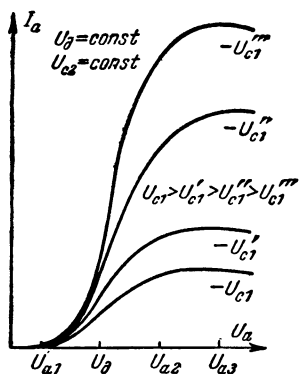


Рис. 5. Анодные характеристики.

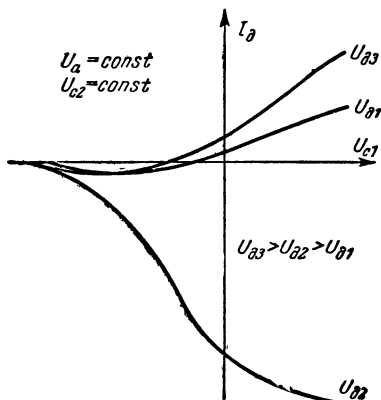


Рис. 6. Динодно-сеточные характеристики.

жения на диноде. Этот ток обусловлен прямым попаданием на анод части первичных электронов, вылетающих с катода лампы. При дальнейшем повышении анодного напряжения вторичные электроны, эмиттируемые динодом, начинают испытывать действие ускоряющего поля между анодом и динодом, и анодный ток сильно возрастает.

Такое увеличение анодного тока продолжается до тех пор, пока напряжение на аноде не достигает значения U_{a2} , при котором поле анода начинает влиять на поток первичных электронов, направляющийся к диноду. Еще большее увеличение анодного напряжения приводит к перераспределению первичного катодного тока между анодом и динодом в сторону уменьшения числа первичных электронов, попадающих на динод. В результате происходит некоторое снижение тока вторичных электронов и, следовательно, перегиб анодных характеристик. Чем меньше отрицательное напряжение на управляющей сетке, тем при меньших анодных напряжениях наступает перегиб характеристик. Внутреннее сопротивление лампы по

анодной цепи $R_{ia} = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ определяется также, как и для обычных ламп. Произведение $S_{a,c} R_{ia} = \mu_{a,c}$ называется коэффициентом усиления по анодной цепи.

На рис. 6 приведена зависимость динодного тока от напряжения на управляющей сетке при различных напряжениях на диноде

и постоянных напряжениях на аноде и экранирующей сетке. Так как за положительное направление диодного тока согласно формуле (1) условились считать направление его из внешней цепи в диод (рис. 2), то при построении диодных характеристик на положительной оси токов мы будем откладывать результирующие значения диодного тока, обусловленные первичным электронным потоком, а на отрицательной — вторичным электронным потоком.

При небольших напряжениях на диноде $U_{д1}$, значительно меньших анодного, тока вторичных электронов нет (вследствие недостаточной энергии первичных электронов). Диодный ток, обусловленный лишь первичными электронами, мал, так как большая часть первичного тока перехватывается анодом.

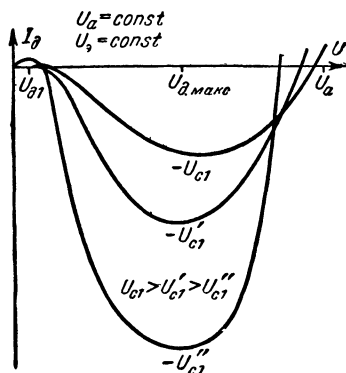


Рис. 7. Динактронные характеристики.

При постепенном увеличении диодного напряжения из диода начинают выбиваться вторичные электроны, и, когда вторичный ток станет больше первичного, ток диода изменит свое направление. Одновременно меняет свой знак и крутизна диодного тока по первой сетке $S_{д.с}$ (становится отрицательной). Это означает, что при увеличении напряжения на управляющей сетке увеличивается ток вторичных электронов. При напряжении на диноде $U_{д2}$, равном примерно половине анодного, диодный ток достигает максимальной величины. Дальнейшее увеличение напряжения на диноде

приводит к ослаблению действия ускоряющего поля анод-диод и к снижению вторичного тока.

При увеличении напряжения на управляющей сетке возрастает плотность электронного потока, и увеличивается пространственный заряд около диода. Это приводит к снижению тока вторичных электронов и к перегибу диодно-сеточных характеристик. При напряжении на диноде $U_{д3}$, близком к анодному, ускоряющее поле анод-диод снижается до нуля, вследствие чего вторичные электроны не могут преодолеть отталкивающее действие пространственного заряда и возвращаются обратно на диод. Поэтому диодный ток снова меняет свой знак и величина его определяется только первичным электронным потоком. Крутизна $S_{д.с}$ становится положительной.

Зависимости диодного тока от диодного напряжения при различных напряжениях на управляющей сетке и постоянных напряжениях на аноде и экранирующей сетке приведены на рис. 7. Эти зависимости иногда называют *динактронными характеристиками* лампы с вторичной эмиссией.

При малых значениях напряжений на диноде небольшой первичный диодный ток существует только при положительном напряжении на управляющей сетке, когда плотность первичного электронного потока достаточно велика. В случае отрицательных напряже-

ний на управляющей сетке динодный ток при малых значениях напряжения на диноде равен нулю.

С увеличением напряжения на диноде появляется вторичный электронный ток, а следовательно, и отрицательный динодный ток, который заметно увеличивается с увеличением напряжения на диноде вплоть до некоторого значения $U_{д. макс}$. Крутизна нарастания динодного тока зависит от напряжения на управляющей сетке. С увеличением отрицательного напряжения на управляющей сетке крутизна нарастания динодного тока в функции от динодного напряжения падает.

Дальнейшее увеличение напряжения на диноде приводит сначала к снижению отрицательного динодного тока, а затем к изменению его знака.

Внутреннее сопротивление динодной цепи лампы определяется как отношение приращения напряжения на диноде к вызванному им приращению динодного тока

($R_{ид} = \frac{\Delta U_{д}}{\Delta I_{д}}$) при по-

стоянных напряжениях на остальных электродах. Как следует из динаatronных характеристик, знак сопротивления $R_{ид}$ зависит от режима работы лампы. При $U_{д} < U_{д. макс}$ положительным приращениям динодного напряжения соответствуют отрицательные приращения тока динода, т. е. сопротивление $R_{ид}$ оказывается отрицательным. При $U_{д} < U_{д. макс}$ приращения динодного тока, а следовательно, и знак $R_{ид}$ становится положительным. Произведение $S_{д.с} R_{ид} = \mu_{д.с}$ называется *коэффициентом усиления по динодной цепи лампы* со вторичной эмиссией.

Зависимость анодного тока от динодного напряжения (рис. 8) похожа на динаatronные характеристики, если на них изменить направление динодного тока. Исключение составляют участки характеристик при напряжениях на диноде $U_{д} < U_{д1}$ (где динодный ток равен нулю, а анодный обусловлен током первичных электронов) и при $U_{д} > U_{а}$ (где анодный ток снижается до нуля, а динодный меняет свое направление).

Крутизна анодного тока по динодному напряжению $S_{а.д}$ определяется как отношение приращения анодного тока к приращению напряжения на диноде

$S_{а.д} = \frac{\Delta I_{а}}{\Delta U_{д}}$ при постоянных напряжениях на остальных электродах лампы и имеет положительное значение при $U_{д} < U_{д. макс}$ и отрицательное при $U_{д} > U_{д. макс}$.

Зависимость динодного тока от напряжения на аноде показана на рис. 9. При напряжениях на аноде, меньших чем напряжение на диноде, тока вторичной эмиссии нет, и динодный ток имеет поло-

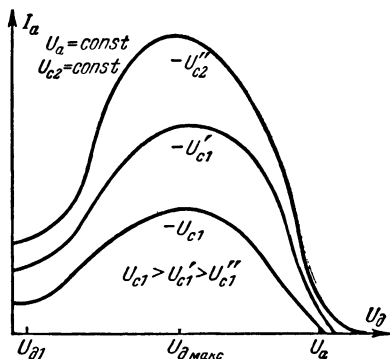


Рис. 8. Анодно-динодные характеристики.

жительное направление. Поле анода при этом не оказывает почти никакого влияния на первичный электронный поток, поэтому в некоторых пределах характеристика имеет плоский участок.

Как только напряжение на аноде станет соизмеримым с напряжением на диноде, появляется ток вторичной эмиссии, и характеристика динодного тока начинает круто падать. При некотором значении анодного напряжения U_{a0} ток первичных электронов, попадающих на динод, уравнивается током вторичных электронов, покидающих динод, и динодный ток уменьшается до нуля. Дальнейшее увеличение анодного напряжения приводит к росту отрицательного значения динодного тока. При наличии $U_a > U_{a1}$ происходит перераспределение первичного электронного потока между анодом и динодом, вследствие чего дальнейшего роста динодного тока не наблюдается.

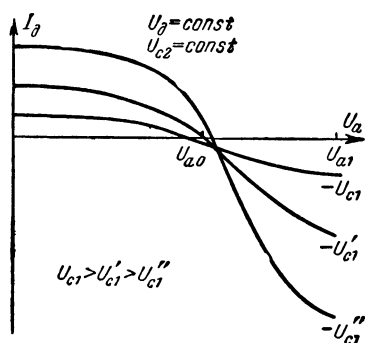


Рис. 9. Динодно-анодные характеристики.

Крутизна динодного тока по аноду $S_{д.а}$ (см. рис. 9) определяется как отношение приращения динодного тока к приращению напряжения на аноде $\left(S_{д.а} = \frac{\Delta I_d}{\Delta U_a}\right)$ при постоянных напряжениях на диноде и экранирующей сетке лампы и представляет собой отрицательную величину.

ОСОБЕННОСТИ ПИТАНИЯ ДИНОДНОЙ ЦЕПИ

Так как динодный ток в лампе со вторичной эмиссией имеет направление, обратное анодному току, поэтому к схеме питания динодной цепи предъявляются особые требования. При присоединении к диноду источника питания напряжением E_d и выходным сопротивлением $R_{вых}$ протекание динодного тока I_d по сопротивлению $R_{вых}$ повышает потенциал динода на величину $\Delta U_d = I_d R_{вых}$. При достаточном большом значении $R_{вых}$ напряжение динода может повыситься до значения, близкого к напряжению анода. Из зависимостей анодного и динодного токов от напряжения на диноде (рис. 7 и 8) следует, что такое повышение динодного напряжения приведет к недопустимому снижению обоих токов лампы. Для устранения этого явления необходимо снижать выходное сопротивление источника питания до такого значения, при котором падение напряжения на нем не достигнет заметной величины. Например, для лампы 6В1П рекомендуемое значение $R_{вых}$ не должно превышать 1,5 ком.

Для получения малого выходного сопротивления можно шунтировать выпрямитель небольшим нагрузочным сопротивлением R_n , требуемой величины (рис. 10). Однако такой способ питания требует большой мощности источника питания и связан с бесполезной потерей значительной части этой мощности на нагрузочном сопро-

ный и диодный токи лампы. Чем сильнее проявляется тормозящее действие пространственного заряда, тем меньше сказывается нестабильность коэффициента вторичной эмиссии на величине анодного и диодного токов лампы.

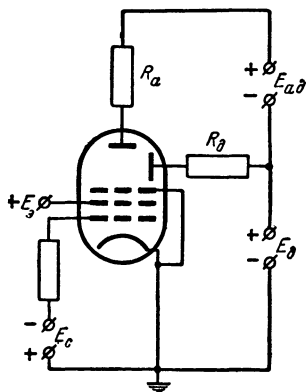


Рис. 12. Схема последовательного включения источников диодного и анодного питания.

Однако стабилизирующего действия околодиодного пространственного заряда все же недостаточно для полного устранения шумов вторичной эмиссии. Поэтому повышенный уровень шумов в лампе с вторичной эмиссией ограничивает область ее применения. В тех случаях, когда повышенный уровень собственных шумов схемы недопустим (например, при усилении чрезвычайно слабых сигналов), лампы с вторичной эмиссией применять не следует. Еще одной причиной того, что лампы с вторичной эмиссией не нашли пока широкого применения, является изменение их параметров во время работы. Длительная электронная бомбардировка вторично-эмиссионного слоя поверхности динода приводит к снижению с течением времени коэффициента вторичной эмиссии, а, следовательно, и к снижению

крутизны анодного и диодного токов. Поэтому в настоящее время лампы с вторичной эмиссией используются главным образом в импульсном режиме, так как при этом нестабильность их параметров сказывается значительно меньше.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАМП С ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИЕЙ УСИЛИТЕЛИ

Вследствие того, что у ламп с вторичной эмиссией имеется два выходных электрода (анод и динод) возможно строить на них одноламповые двухтактные усилители и фазоинверторы. В этом разделе мы получим основные соотношения, необходимые для расчета таких схем.

Двухтактный усилитель. На рис. 13 показана схема усилителя на лампе с вторичной эмиссией с нагрузками R_a в анодной и R_d в динодной цепях. Увеличение положительного напряжения сигнала на управляющей сетке на величину $\Delta U_{вх}$ вызывает соответствующее приращение тока анода $\Delta I_a = S_{a,c} \Delta U_{вх}$ и тока динода $\Delta I_d = S_{d,c} \Delta U_{вх}$. При этом потенциал анода понижается на величину $\Delta U_a = \Delta I_a R_a$, а потенциал динода повышается на величину $\Delta U_d = \Delta I_d R_d$. Таким образом, напряжения, снимаемые с анодного и динодного выходов лампы, оказываются в противофазе,

и приведенная схема может быть использована как двухтактный усилитель или как фазоинвертор. Отношения $\frac{\Delta U_a}{\Delta U_{вх}} = K_a$ и $\frac{\Delta U_{п}}{\Delta U_{вх}} = K_d$ называются соответственно коэффициентами усиления по анодному и динодному выходам.

При расчете усилительных схем на лампе с вторичной эмиссией следует учитывать, что ток вторичных электронов зависит как от напряжения на аноде, так и от напряжения на диноде. Поэтому в формулы для K_a и K_d должны одновременно входить величины как R_a , так и R_d . При расчете удобно пользоваться эквивалентной схемой лампы с вторичной эмиссией с нагрузками в анодной и динодной цепях (рис. 14). Анализ приведенной эквивалентной схемы дает следующие формулы для определения коэффициентов усиления K_a и K_d :

$$K_a = \frac{-\mu_{ac} R_a}{R_a + R_{ia} \left(1 + \frac{R_d}{R_{id}}\right)}, \quad (2)$$

$$K_d = \frac{-\mu_{dc} R_d}{R_d + R_{id} \left(1 + \frac{R_a}{R_{ia}}\right)}. \quad (3)$$

Если необходимо снимать с анодного и динодного выходов равные по амплитуде напряжения (если необходимо иметь $K_a = K_d$), то, как это следует из формул (2) и (3), должно выполняться соотношение

$$\frac{R_a}{R_d} = \frac{S_{dc}}{S_{ac}}. \quad (4)$$

В случае, если к активным сопротивлениям R_a и R_d присоединены параллельные конденсаторы, соответственно емкостью C_a и C_d , то к условию (4) добавляется еще условие

$$\frac{C_a}{C_d} = \frac{S_{ac}}{S_{dc}}. \quad (5)$$

В качестве иллюстрации подсчитаем с помощью вышеприведенных формул коэффициенты усиления в двухтактном усилителе, построенном на лампе 6В1П. Лампа 6В1П имеет следующие параметры $S_{ac} = 30 \text{ ма/в}$, $S_{dc} = 20 \text{ ма/в}$, $R_{ia} = 100 \text{ ком}$, $R_{id} = 3,5 \text{ ком}$. Величины нагрузочных сопротивлений выбираем следующими: $R_a = 1 \text{ ком}$, $R_d = 1,5 \text{ ком}$. Паразитными междueleктродными емкостями пренебрегаем.

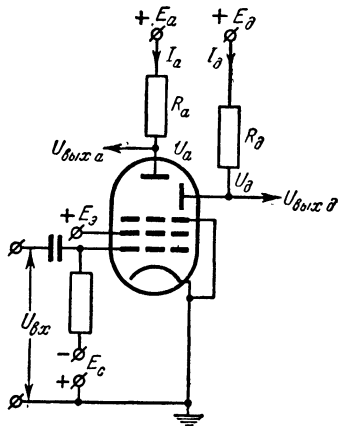


Рис. 13. Схема двухтактного усилителя на лампе с вторичной эмиссией.

Так как величины нагрузочных сопротивлений удовлетворяют соотношению (4)

$$\frac{R_a}{R_d} = \frac{S_{дс}}{S_{ас}} = \frac{2}{3},$$

то коэффициент усиления K_a и K_d равны между собой. Поэтому достаточно определить один из них

$$K_a = K_d = \frac{30 \cdot 10^{-8} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{10^3 + 100 \cdot 10^3 \left(1 + \frac{1,5 \cdot 10^3}{3,5 \cdot 10^3} \right)} \approx 21.$$

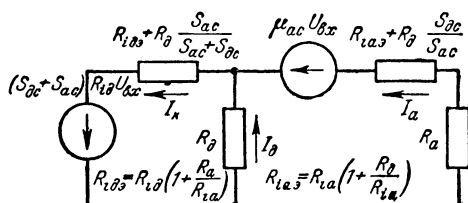


Рис. 14. Эквивалентная схема лампы с вторичной эмиссией с нагрузками в анодной и диодной цепях.

Катодный повторитель. Большая величина анодно-сеточной крутизны $S_{a,c}$ лампы с вторичной эмиссией позволяет построить широкополосный катодный повторитель с коэффициентом передачи близким к 1. Схема такого катодного повторителя приведена на рис. 15.

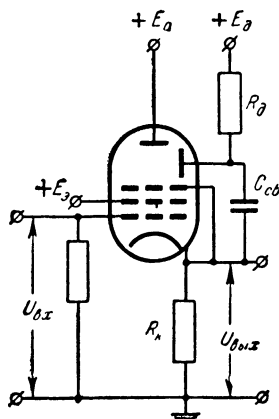


Рис. 15. Схема катодного повторителя на лампе с вторичной эмиссией.

Высокое значение коэффициента передачи достигается путем применения отрицательной обратной связи с диода на катод через конденсатор C_{cb} . Если емкость конденсатора C_{cb} достаточно велика, то можно считать, что диод по переменному току соединен с катодом. При таком условии цепь переменной составляющей анодного тока будет замыкаться на общую шину через катодную нагрузку R_k , и в формулу для коэффициента передачи схемы K будет входить крутизна анодного тока $S_{a,c}$ (вместо крутизны катодного тока при отсутствии конденсатора C_{cb})

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \approx \frac{S_{a,c} R_k}{1 + S_{a,c} R_k}. \quad (6)$$

Так как в формулу (6) входит анодно-сеточная крутизна $S_{a,c}$, которая в лампе с вторичной эмиссией

имеет большую величину, то уже при сравнительно небольших значениях R_k коэффициент передачи получается близким к единице. Так, например, при $R_k=600$ ом катодный повторитель на лампе 6В1П ($S_a=30$ ма/в) имеет коэффициент передачи $K=0,95$

Высокоомный входной каскад. Синфазность диодного и сеточного напряжений в лампе с вторичной эмиссией может быть использована для построения каскада с малой входной емкостью.

В ряде практических случаев (например, при измерении удельных электропроводностей различных пород, почв, при биологических исследованиях) необходимо, чтобы измерительная аппаратура обладала входным сопротивлением в несколько мегом в довольно широком диапазоне частот.

Входное сопротивление лампового усилительного каскада обычно можно представить в виде параллельно соединенных активного сопротивления $R_{вх}$ и емкости $C_{вх}$. Величина активного сопротивления $R_{вх}$ определяется практически сопротивлением утечки в цепи управляющей сетки лампы, которое может быть выбрано довольно большим (вплоть до десятков мегом). Поэтому уже на сравнительно невысоких частотах входное сопротивление каскада будет определяться главным образом его емкостной составляющей. Так, например, если $C_{вх}=10$ пф, то на частоте $f=100$ кГц емкостная составляющая имеет сопротивление

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_{вх}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-12}} = 160 \text{ ком},$$

т. е. значительно меньше, чем активная составляющая.

Увеличить входное сопротивление каскада можно путем частичной компенсации входной емкости, которая заключается в следующем. Величина входной емкости определяется величиной переменного тока, потребляемого схемой от источника сигнала. Чем больше потребляемый ток, тем большее значение имеет входная емкость. Так как в лампе с вторичной эмиссией диодный ток имеет направление от диода к нагрузке, то часть диодного тока через емкость управляющая сетка — диод поступает к источнику сигнала, уменьшая тем самым потребление от него тока, а, следовательно, и входную емкость схемы.

На рис. 16 приведена схема каскада на лампе 6В1П, имеющего входную емкость $C_{вх}=0,5$ пф.

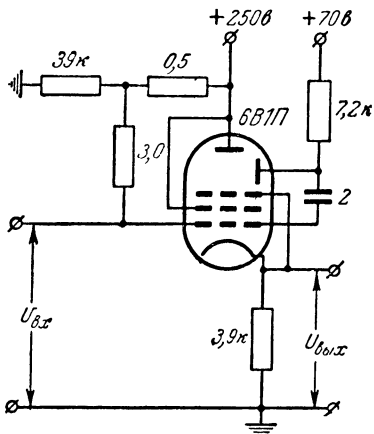


Рис. 16. Схема каскада с уменьшенной входной емкостью.

ГЕНЕРАТОРЫ

Гармонический динактронный генератор. Поскольку в лампе с вторичной эмиссией диодный ток течет от диода во внешнюю цепь, то диод можно считать источником энергии. Как видно из динактронных характеристик лампы (рис. 7), на участке $U_d < U_{d, \max}$ увеличение напряжения на диоде приводит к росту отрицательного значения диодного тока. Следовательно, на этом участке диод-

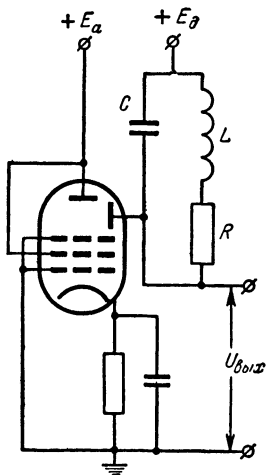


Рис. 17. Схема динактронного генератора на лампе с вторичной эмиссией.

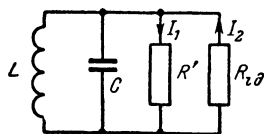


Рис. 18. Эквивалентная схема диодной цепи динактронного генератора.

ная цепь лампы обладает отрицательным внутренним сопротивлением.

Известно, что, если к устройству с отрицательным сопротивлением присоединить колебательный контур, то в нем будут поддерживаться незатухающие гармонические колебания. По такому принципу работают известные динактронные генераторы на тетрадах. (Тетроды обладают отрицательным внутренним сопротивлением в режимах, соответствующих падающему участку на анодных харак-

теристиках). Очевидно, что динактронный генератор можно создать и на лампе с вторичной эмиссией, присоединив колебательный контур к ее диоду. Поскольку протяженность падающего участка на динактронной характеристике лампы с вторичной эмиссией значительно больше протяженности падающего участка на анодной характеристике тетрода, то с динактронного генератора на лампе с вторичной эмиссией можно получить и значительно большую амплитуду напряжения, чем с такого же генератора на тетроде.

Схема динактронного генератора на лампе с вторичной эмиссией приведена на рис. 17. Сопротивление R представляет собой сопротивление потерь в контуре. Для поддержания в генераторе незатухающих колебаний необходимо, чтобы энергия, поступающая в контур из лампы, была не меньше энергии, теряемой на сопротивлении R . Колебательный контур соединен по переменному току параллельно с отрицательным сопротивлением диодной цепи лампы $R_{ид}$. Поэтому для получения необходимых количественных соотношений между R и $R_{ид}$ представим реальный колебательный контур в виде параллельно соединенных идеального колебательного контура без потерь и некоторого сопротивления потерь R' , эквива-

лентного сопротивления R (рис. 18) Величина сопротивления R' рассчитывается по формуле

$$R' = \frac{L}{RC}. \quad (9)$$

Из эквивалентной схемы (рис. 18) видно, что для полной компенсации потерь необходимо выполнение условия

$$I_2 \geq I_1,$$

или, переходя к сопротивлению, получим

$$R' \geq |R_{ид}|. \quad (10)$$

На практике потери в контуре удобнее характеризовать его добротностью Q , поэтому условие (10) лучше преобразовать к виду

$$Q \sqrt{\frac{L}{C}} \geq |R_{ид}|. \quad (11)$$

Таким образом, если в схеме генератора выполняется соотношение (11), то в ней обязательно возникают незатухающие колебания.

В качестве примера определим, возникнут ли незатухающие колебания в схеме динаatronного генератора на лампе 6В1П, если известны следующие параметры схемы $|R_{ид}| = 8 \text{ ком}$, $L = 550 \text{ мкГн}$, $C = 220 \text{ пФ}$, $Q = 60$.

$$\text{Находим величину } R' = Q \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \sqrt{\frac{550 \cdot 10^{-6}}{220 \cdot 10^{-12}}} = 95 \text{ ком}.$$

Условие (10) выполняется ($95 \text{ ком} > 8 \text{ ком}$) и, следовательно, колебания в схеме генератора будут незатухающими.

Как видно из приведенного примера R' больше $|R_{ид}|$. Это означает, что энергия, поступающая за каждый период из лампы в контур, больше энергии, расходуемой в нем. Следовательно, с каждым новым периодом амплитуда колебаний все больше и больше нарастает. Однако это нарастание продолжается не беспрестанно. Как только напряжение на диноде приблизится к значению $U_{д. макс.}$, величина $R_{ид}$, как это следует из динаatronных характеристик (рис. 7), возрастет и при некотором напряжении на диноде станет равным R' . Это будет означать, что энергия, поступающая в контур, равна энергии, теряемой в нем. При этом в схеме устанавливается постоянная амплитуда колебаний. Таким образом, амплитуда установившихся колебаний в динаatronном генераторе зависит от протяженности линейного участка динаatronной характеристики при $U_{д} < U_{д. макс.}$. Современные лампы с вторичной эмиссией позволяют получать амплитуду колебаний в динаatronном генераторе порядка 100 в.

Генератор коротких импульсов. Лампы с вторичной эмиссией имеют особое значение для создания на них генераторов весьма коротких импульсов. В схемах, формирующих короткие импульсы, значения нагрузочных сопротивлений для уменьшения шунтирующего действия паразитных междуэлектродных емкостей должны выбираться как можно меньшими. В практических схемах генераторов импульсов наносекундной длительности ($1 \text{ нсек} = 10^{-9} \text{ сек}$) значе-

ния нагрузочных сопротивлений имеют порядок нескольких десятков ом. При столь малых нагрузках для получения на выходе генератора требуемой амплитуды импульса (порядка десятков вольт) схема должна позволять проходить по нагрузочному сопротивлению токам довольно большой величины (сотни миллиампер). Кроме того, для формирования крутых фронтов выходного импульса схема должна работать при значительных перепадах тока за короткое время. Поэтому, лампа, работающая в такой схеме, должна иметь повышенную анодно-сеточную крутизну, а также обладать малыми паразитными междueleктродными емкостями. В гл. 1 было выясне-

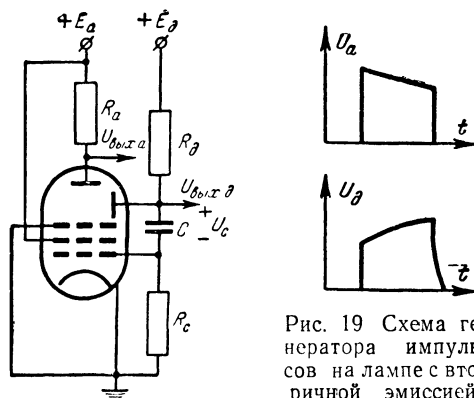


Рис. 19 Схема генератора импульсов на лампе с вторичной эмиссией.

но, что в наибольшей мере всем перечисленным требованиям удовлетворяют лампы с вторичной эмиссией. Практическое применение ламп с вторичной эмиссией в импульсных генераторах показало, что с их помощью можно формировать импульсы с крутизной фронтов почти в 100 раз большей, чем с помощью обычных электронных ламп.

Важное преимущество ламп с вторичной эмиссией перед обычными лампами состоит в синфазности диодного напряжения с напряжением на управляющей сетке. Это обстоятельство позволяет в одноламповых генераторах применять в качестве элемента цепи положительной обратной связи разделительный конденсатор вместо импульсного трансформатора, применяемого в одноступенчатых схемах блокинг-генераторов на обычных лампах. При этом снижаются паразитные емкости схемы и увеличивается крутизна нарастания фронтов импульсов.

На рис. 19 показана одна из схем импульсных генераторов на лампе с вторичной эмиссией. В схеме применена положительная обратная связь с диода на управляющую сетку через разделительный конденсатор C . Рассмотрение работы схемы начнем с того момента, когда конденсатор C заряжен до такого напряжения U_0 , при котором лампа полностью заперта. Начиная с этого момента происходит медленный разряд конденсатора C через сопротивления R_d и R_c . По мере разряда отрицательное напряжение на управляющей сетке снижается, и через некоторое время оно снизится до та-

кого значения, при котором лампа отойдет. Появляющийся при этом ток динода, протекая по диодной нагрузке R_d повышает потенциал динода. Это повышение потенциала динода передается через конденсатор C на сетку, еще больше отпирая лампу и увеличивая анодный и диодный токи. Происходит, так называемое, лавинообразное опрокидывание схемы, сопровождающееся резкими изменениями токов в лампе и формированием крутых фронтов импульсов на аноде и диноде.

В результате увеличения положительного напряжения на управляющей сетке, появляется сеточный ток, и начинается заряд конден-

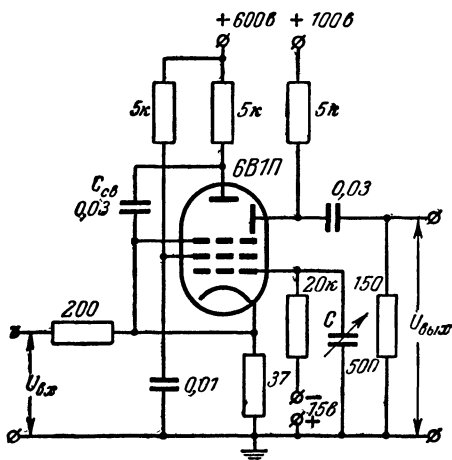


Рис. 20. Схема формирования коротких импульсов на лампе с вторичной эмиссией.

сатора через сопротивление участка сетка-катод. Крутизна нарастания анодного и диодного токов при этом уменьшается. За время заряда конденсатора C происходят медленные изменения анодного и диодного напряжений, что соответствует плоской части вершины выходных импульсов. По мере заряда конденсатора напряжение на сетке уменьшается, но одновременно увеличивается крутизна анодного и диодного токов. Начинается обратный лавинообразный процесс, приводящий к быстрому запирающему лампы. За это время формируется задний фронт импульсов.

После запирающей лампы начинается медленный разряд конденсатора C через сопротивления R_d и R_c , и весь описанный цикл работы снова повторяется. Таким образом, положительная обратная связь между диодом и управляющей сеткой в лампе с вторичной эмиссией приводит к лавинообразным процессам и формированию крутых фронтов импульсов. В схеме, собранной на лампе 6В1П, длительность фронтов импульсов, снимаемых с анодной нагрузки сопротивлением 10 ом, составляет 10 нсек, амплитуда импульсов—10 в.

На рис. 20 приведена схема генератора на лампе 6В1П, формирующая импульсы с еще более короткими фронтами (2—5 нсек)

В нормальном состоянии лампа заперта отрицательным напряжением смещения, поданным на управляющую сетку. При подаче на катод запускающего отрицательного импульса лампа отпирается и благодаря положительной обратной связи между анодом и катодом в схеме начинается лавинообразный процесс, аналогичный описанному в схеме генератора с диодно-сеточной связью. Отрицательный перепад напряжения, возникающий на аноде лампы при ее отпирании, передается через конденсатор связи $C_{св}$ на катод. Понижение потенциала катода равносильно увеличению потенциала управляющей сетки, поэтому анодный ток в лампе еще больше возрастает. Увеличение анодного тока приводит к дальнейшему снижению потенциала анода и к еще большему возрастанию положительной разности потенциалов между управляющей сеткой и катодом. В этот момент формируется короткий фронт выходного импульса, снимаемого с диодной нагрузки. В результате резкого увеличения положительного напряжения на управляющей сетке, появляется сеточный ток, которым заряжается конденсатор C , изменяя емкость которого можно менять длительность импульса. Во время заряда этого конденсатора положительное напряжение на управляющей сетке снижается и дальнейший рост анодного и диодного токов прекращается. В этот момент формируется плоская вершина выходного импульса.

Длительность импульса зависит от времени заряда конденсатора C . При конденсаторе C емкостью 20 пф длительность импульсов в описываемой схеме составляет 20 нсек, амплитуда импульсов, снимаемых с диодной нагрузки, — 70 в.

ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ КЛЮЧИ

В современной импульсной технике большое внимание уделяют созданию «ключевых схем», т. е. устройств, замыкающих и размыкающих электрическую цепь под воздействием управляющих импульсов. Основное требование, которое предъявляется к таким схемам, заключается в получении возможно большей скорости переключения.

В этом смысле наиболее перспективны электронные ключи, основанные на использовании ламп с вторичной эмиссией. Как уже отмечалось, в лампе с вторичной эмиссией при протекании по диодной нагрузке вторичного тока повышение потенциала диода вызывает увеличение диодного тока, что в свою очередь приводит к еще большему повышению потенциала диода. Так продолжается до тех пор, пока напряжение на диоде не достигнет значения, примерно равного половине напряжения на аноде. Дальнейшее увеличение потенциала диода приводит к снижению диодного тока (рис. 7), после чего увеличение диодного напряжения прекращается, и между анодом и диодом устанавливается небольшая постоянная разность потенциалов. Если теперь увеличить или уменьшить напряжение на аноде, то соответственно увеличится или уменьшится вторичный ток и увеличится или уменьшится потенциал диода. Другими словами, напряжение на диоде как бы «следит» за напряжением на аноде, изменяясь в полном с ним соответствии, т. е. *между анодом и диодом устанавливается электрический контакт.*

Если отпирать и запираť лампу импульсами по первой сетке, то получим управляемый электронный контакт, т. е. «ключ». Такие

ключи могут найти широкое применение в вычислительной технике, в различных системах автоматического регулирования и в импульсных системах связи.

На рис 21 показана схема «запоминания» напряжения, использующая ключ на лампе с вторичной эмиссией. Схема запоминает мгновенные значения напряжения сигнала в момент прихода управляющего импульса и удерживает эти значения до прихода следующего импульса. Накопительным элементом в схеме служит конденсатор C . Входной сигнал подается на анод лампы через трансформатор Tr .

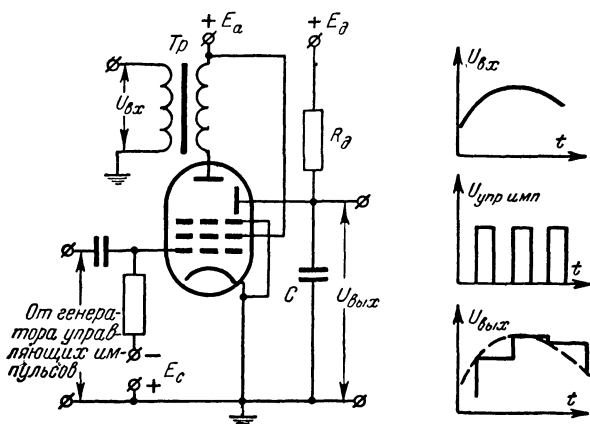


Рис. 21. Схема запоминания напряжения на лампе с вторичной эмиссией.

мотор Tr , управляющие импульсы поступают на первую сетку, выходное напряжение снимается с конденсатора C , присоединенного к диноду.

В интервалах между управляющими импульсами лампа заперта отрицательным напряжением смещения E_c и сигнал на выход схемы не проходит. При подаче на управляющую сетку положительного импульса достаточной амплитуды лампа отпирается, и конденсатор быстро заряжается до напряжения, близкого к мгновенному значению напряжения на аноде в момент прихода управляющего импульса. Заряд конденсатора C происходит через внутреннее сопротивление участка анод-динод $R_{a.д.}$. Постоянная времени заряда $\tau_{зар}$ равна $\tau_{зар} = CR_{a.д.}$. В лампе 6В1П величина $R_{a.д.}$ составляет 2—3 ком. В интервалах между управляющими импульсами лампа заперта и напряжение на конденсаторе «запоминается» до прихода следующего импульса. Строго говоря, происходит медленный разряд конденсатора через сопротивление R_d , но соответствующим выбором постоянной времени разряда $\tau_{разр} = CR_d$ можно добиться, чтобы выходное напряжение практически не изменялось в промежутке между импульсами $t_{п.}$. Очевидно, для этого необходимо, чтобы $\tau_{разр} \gg t_{п.}$

ПЕРЕСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ

Использование ламп с вторичной эмиссией в счетно-решающих устройствах позволяет добиться чрезвычайно высоких скоростей их работы. На рис. 22 показана пересчетная импульсная схема на лампе 6В1П, работающая при частоте следования входных импульсов вплоть до 80 Мгц. Описываемая схема делит частоту следования импульсов в 5 раз, т. е. на ее выходе появляется один импульс при поступлении на вход серии из 5 импульсов.

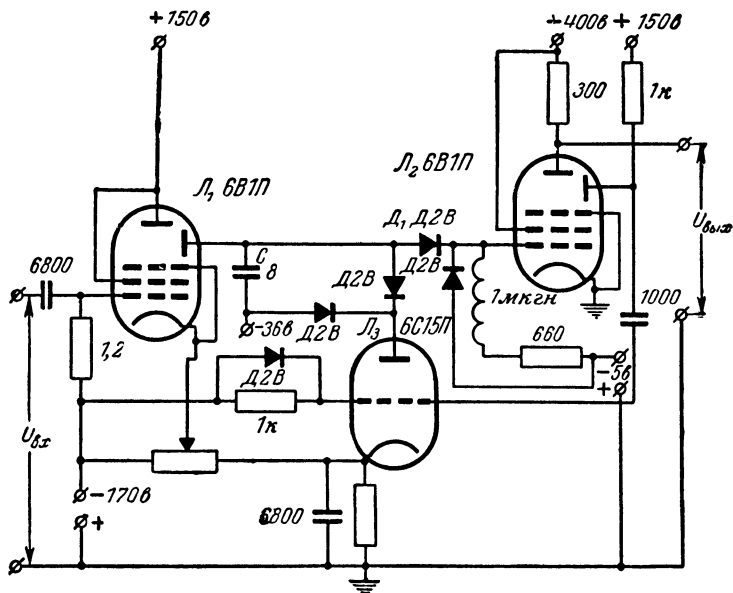


Рис. 22. Быстродействующая пересчетная схема.

В нормальном состоянии все лампы заперты отрицательным напряжением смещения, поданным на их управляющие сетки. На диноде лампы \mathcal{L}_1 напряжение составляет -36 в. При этом диод \mathcal{D}_1 заперт. При поступлении на вход схемы каждого импульса лампа \mathcal{L}_1 отпирается и напряжение на ее диноде повышается на 8 в. В промежутках между импульсами динодное напряжение запоминается на накопительном конденсаторе \mathcal{C} . В результате после прохождения четырех первых импульсов напряжение на диноде лампы \mathcal{L}_1 достигает такого уровня, при котором диод \mathcal{D}_1 отпирается и пятый импульс поступает на управляющую сетку лампы \mathcal{L}_2 , отпирая ее. При отпираании лампы \mathcal{L}_2 на ее аноде возникает отрицательный импульс, служащий выходным импульсом схемы. Одновременно на диноде появляется положительный импульс, который поступает на сетку триода \mathcal{L}_3 и отпирает его. При этом происходит разряд накопительного конденсатора \mathcal{C} , и схема вновь готова к пересчету следующих пяти импульсов.

Цена 06 коп.